



多浓度营养盐处理对微生物胶结砂土 均匀性与强度的影响

王绪民¹, 郭伟^{1,2}, 余飞³, 易朝¹, 孙霖¹

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院 武汉 430068; 2. 贵州宏信创达工程检测咨询有限公司 550014;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要:采用二次注入菌液方式,制备不同浓度营养盐处理的 MICP(微生物诱导碳酸钙沉淀)胶结砂样。选用巴氏芽孢杆菌作为固化细菌,采用单一浓度(0.5、1.0 mol/L)和多浓度相结合(前期采用 0.5 mol/L,后期采用 1.0 mol/L)的处理方式注射营养盐(尿素/氯化钙混合液),研究多浓度营养盐结合处理方式对微生物固化砂土强度及均匀性的影响。基于试验测试分析了固化砂土试样不同区间段的强度、弹性模量以及碳酸钙含量。试验结果表明,多浓度营养盐处理方式对固化砂土试样的强度及碳酸钙含量有明显影响;多浓度营养盐结合处理方式能够保证试样有较好的均匀性条件下获得较高强度及弹性模量。基于多浓度营养盐处理方式,探讨分析了影响试样强度和均匀性的基本因素。

关键词:碳酸盐沉淀;胶结砂;抗压强度

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)03-0145-06

Effects of multi-nutrient treatment on the uniformity and strength of MICP-cemented sand

Wang Xuming¹, Guo Wei^{1,2}, Yu Fei², Yi Zhao¹, Sun Lin¹

(1. School of Civil Engineering & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P. R. China;
2. Guizhou Hongxin Chuangda Engineering Detection & Consultation CO. LTD, Guiyang, 550014, P. R. China;
3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430068, P. R. China)

Abstract: The MICP (microbial induction of calcium carbonate precipitation) cemented sand samples are prepared by injecting twice bacteria solution with different concentrations of nutrient salt treatment. *S. pasteurii* is used to induce calcite precipitation, and all the specimens were prepared by injecting a single concentration or multi-concentration nutrient solutions. In this study, 0.5 and 1.0 mol/L urea-calcium chloride solutions are used for the former grouting treatment, while for the latter one, 0.5 mol/L urea-calcium chloride solution is firstly injected; and subsequently, 1.0 mol/L urea-calcium chloride solution is

收稿日期:2016-09-10

基金项目:湖北省自然科学基金(2014CFB601)

作者简介:王绪民(1972-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程胶结土力学特性研究,(E-mail)wxumin@163.com。

Received:2016-09-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of Hubei province (No. 2014CFB601)

Author brief: Wang Xuming (1972-), PhD, associate professor, main research interest: soil mechanics characteristics of geotechnical engineering, (E-mail) wxumin@163.com.

utilized. Based on the experiment, the strength, modulus of elasticity and calcite content of MICP specimens' different sections are analyzed. From the experimental results, it can be found that multi-concentration nutrient treatment has significant influence on the unconfined compressive strength of bio-cemented sand and calcite content. The multi-concentration nutrient treatment can ensure the high strength and elastic modulus of the sample under the condition of good uniformity. Finally, the basic factors that affect the strength and uniformity of samples were discussed based on the method of multi-concentration nutrient treatment.

Keywords: carbonate precipitation; cemented sand; compressive strength

细菌广泛存在于自然界中,大多数细菌均可在矿化沉积过程中扮演着重要的角色,其参与诱导或控制无机矿物沉积的形成,如磷酸盐、硫酸盐、碳酸盐、硅酸盐、硫化物及氧化物等^[1-2]。近年来鉴于传统的土壤改良材料对于自然环境、人文环境的污染,如 1974 年,日本一起丙烯酰胺灌浆造成四例饮用水中毒事件,因此细菌诱导矿化这一环境友好土壤改良方法引起众多学者的关注。

研究表明,通过巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉淀方法改良土壤后,土壤硬度可增加 3 倍,明显提高土壤的工程参数^[3]。Paassen 等^[4-5]利用注入巴氏芽孢杆菌的方法进行了 MICP 固化土壤的研究,发现当碳酸钙含量为 0% 到 24% 时,无侧限抗压强度的范围为 1 到 12 MPa,同时也进行了较大规模的试验(100 m³),发现 MICP 法可有效提高颗粒状土壤的硬度。Rong 等^[6]研究发现固定注射速率、非连续注浆方式有利于细菌吸附,且采用该方式可获得较高强度的试样。Qabany 等^[7]发现营养盐浓度、反应间隔时间和有效注射速率对碳酸钙置换率有显著影响。张越等^[8]研究发现 Ca(CH₂COO)₂ 作为钙源,碳酸盐沉淀对试样有较大的强度提高。

纵观以上研究,菌液多为一次注入或循环注入。单次注入菌液在后期注营养盐过程中,菌株易被冲刷出试样造成菌株的大量减少。循环注入菌液则造成试验成本的增加及操作的繁复。为此本次室内试验在砂样内形成一定碳酸钙后二次注入菌液,对砂样内的附着的菌株进行补充。本次试验基于这一操作方式来研究单一或多浓度营养盐结合处理对胶结试样强度及均匀性的影响。

2 微生物固化试验

2.1 试验材料

实验采用厦门 ISO 标准砂(99.7% 石英),最小干密度 1.53 g/mL,最大干密度 1.81 g/mL,不均匀

系数 C_u 为 5.08。试验菌种为巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*, 编号 ATCC 11859),购自美国菌种保藏中心。细菌接种培养至培养基出现浑浊。采用波长为 600 nm 的紫外可见分光光度计测得细菌光密度并将菌液浓度调至 2.0(OD_{600})。

2.2 试样制备

本试验采用内径 $D=38$ mm 的 PVC 管制备试样。试样制备过程:1)PVC 管底端用橡胶塞封堵,并在底端放置一块透水石。2)将 302 g 标准砂倒入 PVC 管,采用游标卡尺控制砂样高度,制成高为 16 cm 的砂柱,并在顶端放置另一块透水石。3)将 OD_{600} 为 2.0 细菌悬浮液,采用蠕动泵以 5 mL/min 的速率从试样上端注入 70 mL(菌液淹没试样顶端透水石),静置 2 h,以保证细菌在试样内充分扩散并吸附于砂土颗粒表面^[10]。4)采用蠕动泵以 5 mL/min 的速率从试样上端注入 70 mL 尿素/氯化钙混合液(后文简称营养盐)然放入设置为 30 °C 恒温箱培养。5)试样反应 12 h 后再次由 PVC 管上端注入 70 mL 营养盐。6)第 4 次注营养盐时,重复步骤 3、4、5 进行二次注入菌液,待达到预定处理次数后停止注入营养盐。

2.3 试验方案

本文主要探究多浓度营养盐结合处理方式对胶结砂土试样均匀性及强度的影响。试验采用较低浓度(0.5 M-mol/L)营养盐和较高浓度(1.0 M-mol/L)营养盐溶液处理试样^[7]。试样共分 3 组(A~C 组),每组 3 个试样。A、C 组采用单一浓度营养盐,B 组采用 2 种不同浓度营养盐相结合的处理方式,即先注射 7 次浓度为 0.5 M-mol/L 的营养盐之后注射浓度为 1.0 M-mol/L 的营养盐(处理时间间隔均为 12 h),具体方案见表 1。取固化后砂土试样将其均分为 3 段(U 段、M 段、D 段),根据《土工试验方法标准》^[9]无侧限抗压强度试验测试,试验加载速率取 0.5 mm/min。

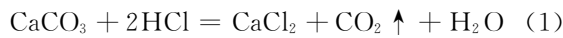
表 1 微生物胶结试验方案
Table 1 Experiment scheme of MICP

化学处 理方式	试样编号	时间 间隔/h	营养盐浓 度/mol/L	注液次数
A	1#~3#	12	0.5	14
B	1#~3#	12	0.5+1.0	7+7
C	1#~3#	12	1.0	14

3 试验结果与分析

3.1 MICP 胶结砂样强度分析

3.1.1 碳酸钙含量分析 将无侧限抗压剪切破坏后的试样回收碾碎进行碳酸钙定量化学试验。用过量浓度约 2 mol/L 的盐酸浸洗试样,直至没有气泡产生为止,进而测定方解石含量 $C_{\text{钙}}$ 。测定碳酸钙含量化学方程式为

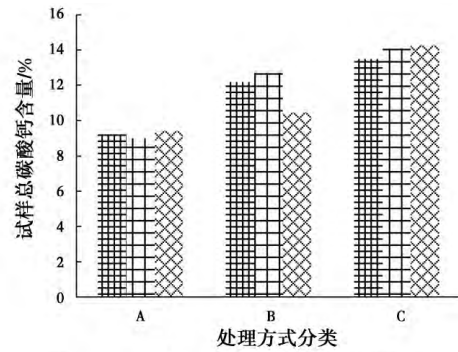


$$C_{\text{钙}} = \frac{M_{\text{钙+砂}} - M_{\text{砂}}}{M_{\text{砂}}} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{钙+砂}}$ 、 $M_{\text{砂}}$ 分别为试样浸酸前后干重

图 1 为各组 MICP 胶结砂样的总体碳酸钙含量。其中 A、B、C3 组试样平均碳酸钙含量为 9.2%、11.79%、13.95%。C 组试样采用 1.0 mol/L 营养盐溶液是 A 组营养盐浓度的 2 倍,而试样结果中 C 组试样平均碳酸钙含量为 A 组 1.52 倍,涨幅小于营养盐浓度的提高。同时 B 组试样采用两种浓度营养盐(前期 0.5 mol/L,后期 1.0 mol/L),所产生的碳酸钙含量较 A 多 2.59%,相较于 C 少 2.16%。可以看出多种浓度营养盐处理方式对碳酸钙沉积量有较明显影响,且在菌液浓度为 2.0 (OD_{600})时营养盐浓度的提高对碳酸盐沉积的促进作用变缓。B 组试样间碳酸钙含量相差较为明显。故基于微生物的不可控性,试样制作过程还需进一步优化控制减小误差的产生。Harkes 等^[11]关于砂柱强度与碳酸钙含量有着密切关系及其拟合得出的经验曲线,假设可得 3 组 MICP 胶结试样的强度排序为 $C > B > A$ 。

3.1.2 应力-应变曲线分析 图 2 为应力-应变曲线,选取各组中一个试样的无侧限抗压试验结果示意。各试样在加载后随着应变的增加应力也不断增大,随着应力达到峰值后其快速减小,表现为脆性破坏。图 3 为化学处理方式对 MICP 胶结试样强度的影响,所示为各组试样最小破坏峰值。A、B、C 各组

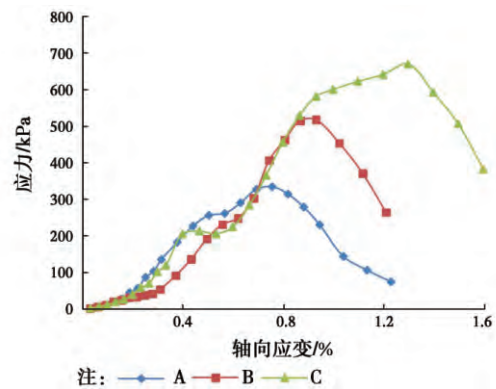


注: ▣ 1#试样 ▤ 2#试样 ▥ 3#试样

图 1 MICP 胶结试样总体碳酸钙含量

Fig. 1 Total calcite content of MICP-cemented sand

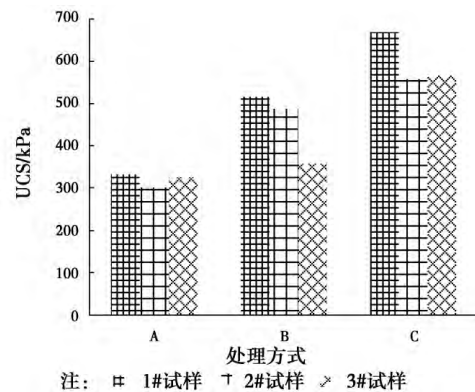
平均最小破坏峰值为 321.27、455.5、599.1 kPa, B 处理方式破坏强度较 A 高出 134.23 kPa,相较于 C 少 143.6 kPa。B 组试样后期采用 1.0 M 营养盐,较其前期注液浓度提高一倍,其强度提高约 42%,可以看出处理方式的不同对试样强度影响较明显。图 4、5 均可以看出 3 组试样的强度大小表现为 $C > B > A$,与上文的碳酸钙含量排序相同,上述假设成立。



注: ● A ■ B ▲ C

图 2 MICP 胶结试样应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of MICP-cemented sand



注: ▣ 1#试样 ▤ 2#试样 ▥ 3#试样

图 3 多营养盐浓度对 MICP 胶结试样强度的影响

Fig. 3 Effect of compound nutrient concentration treatment on strength of MICP-cemented sand

3.2 MICP 胶结砂样均匀性分析

试验过程中将长为 16 cm 的胶结砂样均分为 3 段,通过试样的溶酸处理测试得出胶结试样上段(U 段)、中段(M 段)、下段(D 段)的碳酸钙含量。通过测试试样不同区段的碳酸钙含量以此反映出采用单一或多浓度营养盐所处理试样的均匀性问题。图 4 为 MICP 胶结试样碳酸钙含量分布图。由图可知胶结试样碳酸钙含量总体表现为 U 段至 D 段依次递减趋势。由图中数据得出 A 组试样各段碳酸钙含量的最大最小值相差约为 0.514~2.134,B 组约为 1.475~2.568,C 组约为 1.97~2.908。由上述碳酸钙含量差值范围可以发现 A 组最小,C 组最大,B 组则居于两者之间。差值范围小可说明碳酸钙分布均匀,反之则不然。故 A 试样碳酸钙分布最均匀,C 试样最差,B 试样居于 A 与 C 之间。其中 B 组试样的均匀性较优于 C,这是由于 B 前期采用 0.5 M 营养盐促使碳酸钙沉淀分布均匀,而后期采用 1.0 M 营养盐影响碳酸钙的分布情况,使其均匀性较差于 A。

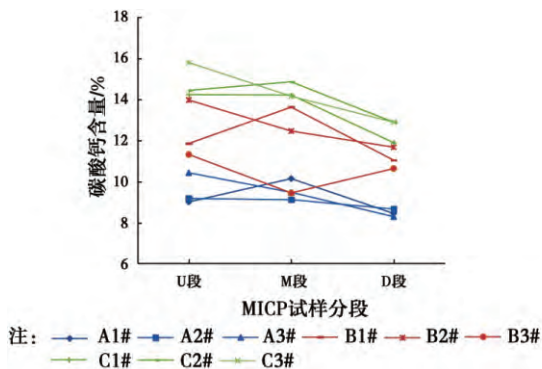


图 4 MICP 胶结试样分段碳酸钙含量分布

Fig. 4 Distribution of CaCO₃ in MICP-cemented sand

图 5 为 MICP 胶结试样不同区段的强度和刚度分布情况。A、B、C 组试样 U、M、D 段强度比分别为 1.25:1.07:1、1.93:1.56:1、2.38:1.59:1,刚度比分别为 1.09:0.68:1、1.42:1.11:1、2.05:1.47:1。由图 5 可直观看出,试样的强度与刚度由 U 段至 D 段呈明显梯度递减 C 组试样变化趋势最为明显,B 组次之,A 组变化最小,图 5(b)中 A 组 M 段刚度较小于 D 段,分析是由于试样分段切割过程对其造成较大扰动所致,故后续试样制作方案还需优化处理。

由图 5 可以看出不同化学处理方式对微生物固化砂土的均匀性影响较大。不论是试样的强度或刚度,A 组(0.5 mol/L)试样的 U 段、M 段、D 段相差

较小,C 组试样制作过程采用高浓度营养盐溶液(1.0 mol/L),试样 U 段至 D 段的强度和刚度值梯度变化最大。结果说明低浓度营养盐可以胶结较深的土体且可保持较好均匀性,而高浓度营养盐处理土体则表现为由上之下强度递减趋势,较适合表成土体硬化。B 组试样采用两种浓度营养盐溶液处理(前期 0.5 mol/L,后期 1.0 mol/L),使其中和了 A 与 C 的特点较适用于胶结深度不大且强度要求较高的土体。

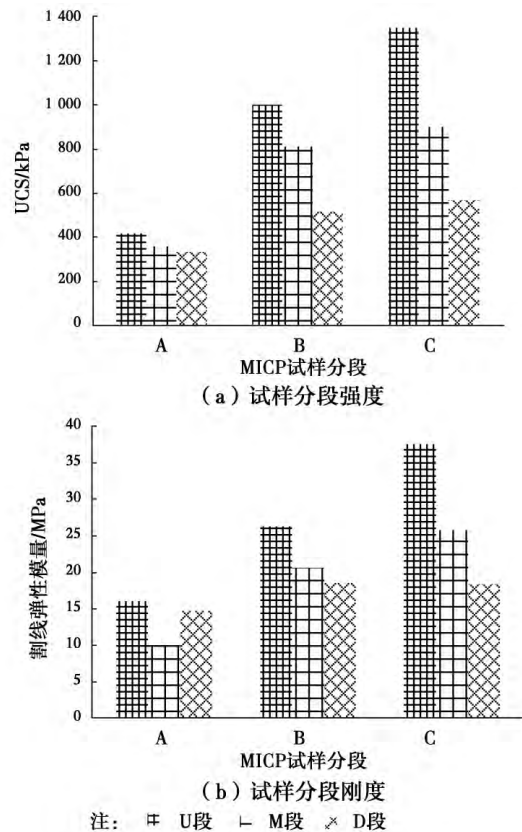


图 5 多浓度营养盐处理方式对 MICP 胶结试样强度、刚度的影响

Fig. 5 Multi-concentration nutrient salt treatment on strength and stiffness of MICP-cemented sand

4 试验结果分析

由试验结果可知,多浓度营养盐处理方式对 MICP 胶结砂样的强度和均匀性有着显著影响,本节基于处理方式的不同对强度和均匀性影响结果进行分析。

制样过程中砂样未出现堵塞现象,营养盐可顺畅注入砂样内。在保证足够的营养盐供给下,高浓度营养盐处理砂样(等浓度菌液处理)可在相同反应时间内产生较多碳酸钙。由前文可以发现试样最小

破坏强度与总碳酸钙有着良好的关联性,整体上试样强度的增大其碳酸钙含量也随着增大。

虽然单一与多浓度营养盐处理试样之间总碳酸钙含量相差不大,但由各组试样最小破坏强度来看,处理方式的不同对试样强度及均匀性影响较大。结合上述分析,这主要是由于碳酸钙在砂颗粒间不同分布形态造成的^[12]。

上述图4、5明显看出,各组试样的碳酸钙含量、破坏强度及割线模量整体表现由上端向下段递减的趋势。这一递减趋势也就产生各组试样均匀性的差异。相关研究表明生物堵塞的程度随距离的增长而加重^[13]。制样过程中菌液由试验上端注入,易造成微生物细胞在上端部分的积累^[14],导致孔隙堵塞使得试样下端菌株数量减少,但A组试样各段测试参数相差不大表明说明菌株的积累对孔隙堵塞作用不大均匀性影响较小。

C组试样各区段离散性最大,碳酸钙含量、强度、割线模量,由U段至D段递减趋势显著。研究发现,营养盐浓度较大时(1.0 mol/L)沉积碳酸钙晶体颗粒较大且分布均匀性较差^[17]。试验中营养盐的上端注入使得上端附着的菌株有充足的营养供给,促使其快速诱导沉淀大量的大颗粒且分布不均匀的碳酸钙颗粒。然后由于微生物代谢过程中向细胞外分泌的黏性大分子胞外聚合物以及诱导的矿物沉淀^[15],使得多孔介质有效孔隙度降低,进而导致堵塞的发生^[16]。因而,C组试样就如倒置筛子层层过滤营养盐中的营养物质,导致越靠近底端的菌株获得的营养物质越少。最终造成C组胶结样胶结效果的梯度下降。

试验中A组全程注入0.5 mol/L营养盐、B组试样前期注入0.5 mol/L营养盐。由于在低浓度营养盐作用下,A组、B组前期诱导产生的碳酸钙晶体颗粒较小且能较为均匀的分布在砂颗粒孔隙间,以此保证注液通道(颗粒孔隙)的通畅,使得远离注液口端处的菌株能够获得充足的营养盐营养元素。由上文可以看到A组试样U段、M段、D段的碳酸钙含量、强度及刚度均相差不大。因而,A组胶结试样整体均匀性较好。B组试样由于受到前期低浓度营养盐作用,沉淀碳酸钙分布均匀。以此作为基础,在保证试样一定的均匀性后试图增加其碳酸钙含量——高浓度营养盐处理。最终在多浓度营养盐作用下,B组试样保存了A组试样的均匀性及C组试

样的较高碳酸钙产量。

针对于实际工程应用,砂土采用高/低浓度相结合的多浓度营养盐处理,可提高施工效率,使其在较短时间内产生较高的强度、刚度并保证其有较好的均匀性,从而确保施工质量。多浓度营养盐胶结砂土具有重要的工程实际意义。

5 结论

1)无侧限加载条件下单一或多浓度营养盐胶结试验均表现为典型的脆性破坏。

2)多浓度营养盐处理对胶结砂样强度及碳酸钙含量影响显著,较大区别于单一浓度营养盐处理砂样的胶结效果。

3)试样碳酸钙含量、强度及刚度由U段至D段均有递减趋势。营养盐浓度越低梯度递减变化越小,反正则不然。

4)采用高/低浓度相结合的多浓度营养盐处理砂样可在较短时间表现较高的强度、碳酸钙含量以及较好的均匀性,较适用于胶结深度不大且强度要求较高的土体,具有重要的工程实际意义。

参考文献:

- [1] LITHY V, WARTHMAN R, VASCONCELOS C, et al. Microbial fossilization in carbonate sediments: A result of the bacterial surface involvement in dolomite precipitation[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(2): 237-245, 249.
- [2] RIVADENEYRA M A, ALGARRA A. L. G. P, RAMOS I, et al. Carbonate and phosphate precipitation by chromohalobacter marismortui [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2006, 23(2): 89-101.
- [3] DEJONG J T, FRITZGES M B, USSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [4] PAASSEN V, DAZA C M, STAAL M M, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 168-175.
- [5] LEON A, PAASSEN V. Ground improvement by microbially induced carbonate precipitation [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2009.
- [6] RONG H, QIAN C X, LI L Z. Influence of molding process on mechanical properties of sandstone cemented

- by microbe cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 238-243.
- [7] QABANY A A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138 (8): 992-1001.
- [8] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(Sup2): 2-79.
- [9] 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准: GB/T 50123-1999[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Geotechnical test standard: GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Planning Press,1999.
- [10] 陈荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机理[D]. 南京:东南大学,2014.
CHEN R H. Preparation and binding mechanism of microbe Cement [D]. NanJing. Southeast University, 2014.
- [11] HARKES M P, BOOSTER J L, PAASSEN L A, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method-bacterial fixation and empirical correlation CaCO₃ vs strength[C]//Proceedings of 1st International Conference BGCE. Delft: [s. n.], 2008: 37-44.
- [12] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C. Biomediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210
- [13] 夏璐, 郑西来, 段玉环, 等. 砂柱微生物堵塞过程及机理分析[J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 749-755.
XIA L, ZHENG X L, DUAN Y H, et al . Analysis of process and mechanism of bioclogging in aqueous media [J]. *Journal of hydraulic Engineering*, 2014, 45 (6): 749-755.
- [14] BEEK C. Restoring well yield in the Netherlands [J]. *Water Works Assoc*, 1984, 76(10):66-72 .
- [15] KOMLOS J, CUNNINGHAM A B, CAMPER A K, et al . Biofilm barriers to contain and degrade dissolved trichloroeth-ylene [J]. *Environment Process*, 2004, 23 (1):69-77 .
- [16] PFEIFFER S R, SZTAJNBOK P, VANDEVELDE T, et al . Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells [J]. *Water Research*, 2000, 34(7):2110-2118 .
- [17] QABANY A A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. *Géotechnique*, 2013, 63 (4): 331-339.

(编辑 胡玲)